



Développement d'un modèle éléments finis du mécanisme de glissement des barrages en remblai avec le code ©Cast3M

Anthony Mouyeaux, Philippe Bressolette, Claudio Carvajal, Laurent Peyras,
Claude Bacconnet, Pierre Breul

► To cite this version:

Anthony Mouyeaux, Philippe Bressolette, Claudio Carvajal, Laurent Peyras, Claude Bacconnet, et al.. Développement d'un modèle éléments finis du mécanisme de glissement des barrages en remblai avec le code ©Cast3M. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. hal-01167705

HAL Id: hal-01167705

<https://hal.science/hal-01167705>

Submitted on 24 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Développement d'un modèle éléments finis du mécanisme de glissement des barrages en remblai avec le code ©Cast3M

Anthony MOUYEAUX^{1,2}, Philippe BRESSOLETTE^{2,3}, Claudio CARVAJAL¹, Laurent PEYRAS¹, Claude BACCONNET^{2,3}, Pierre BREUL^{2,3}

¹ IRSTEA¹ – Unité Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie
3275 Route Cézanne – CS 40061 – 13182 Aix en Provence Cedex 5
{Anthony.Mouyeaux, Laurent.Peyras, Claudio.Carvajal}@irstea.fr

² Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France.

³ CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171 Aubière, France.
{pierre.breul, claudie.bacconnet, philippe.bressollette}@univ-bpclermont.fr

RÉSUMÉ.

Un travail de thèse a été engagé afin de développer une démarche probabiliste permettant d'évaluer la stabilité d'un ouvrage hydraulique en remblai vis-à-vis du mécanisme de glissement à partir des données collectées sur le terrain.

L'objectif de l'article est de présenter une modélisation éléments finis du mécanisme de glissement des barrages en remblai réalisée avec le code ouvert ©Cast3M, dans la perspective de l'utiliser dans une analyse probabiliste intégrant une modélisation de la variabilité spatiale des propriétés du remblai.

Le modèle éléments finis déterministe présenté permet dans un premier temps de modéliser l'écoulement interne au sein du remblai. Ensuite, un calcul mécanique intégrant les pressions interstitielles permet d'évaluer le facteur de sécurité de l'ouvrage grâce à la méthode de réduction de paramètres. Les résultats du modèle sont validés grâce à une comparaison avec ceux obtenus avec le code éléments finis commercial ©Geostudio.

ABSTRACT.

A PhD work has been started to develop a probabilistic process to evaluate the slope stability of embankment dams based on field data.

The article aims to present a finite element embankment dams slope stability analysis model made with the code ©Cast3M, in prospect to use it in a probabilistic analysis based on the representation of the spatial variability of the earth fill properties.

The presented deterministic finite element model is used in a first time to model the seepage through the dam. Then, a mechanical computation taking pore pressure into account allows evaluating the factor of safety with the strength reduction method. The model results are then validated with comparison to the ones obtained with the commercial finite element code ©Geostudio.

MOTS-CLÉS : barrages en remblai, éléments finis, stabilité de pentes, méthode de réduction de paramètres, écoulement

KEY WORDS : embankment dams, finite elements, slope stability, strength reduction method, seepage

¹ Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

1. Introduction

Les ouvrages hydrauliques – barrages et digues – constituent un potentiel de danger important à cause de leur fonction première qui est la rétention d'un volume plus ou moins important d'eau. Lors d'une rupture partielle ou totale d'un tel ouvrage, les conséquences sur les enjeux matériels et surtout humains à l'aval sont considérables [ICOLD 95]. La sécurité de ces ouvrages de Génie Civil se doit donc d'être continuellement assurée, de la phase de construction à celle de démantèlement.

Les barrages en remblai représentent la part majoritaire des parcs de barrages à l'échelle mondiale (74%) et nationale (42%) [ICOLD 03], auxquels s'ajoute un important linéaire de digues fluviales et maritimes. Les ruptures sur ce type d'ouvrage constituent la plupart des ruptures recensées de barrages, et peuvent se produire selon trois modes de défaillance principaux : l'érosion externe due à une submersion de l'ouvrage, l'érosion interne due à un écoulement préférentiel au sein du remblai, et le glissement des talus amont ou aval. Ce dernier mode de rupture n'est pas celui le plus souvent rencontré lors des ruptures d'ouvrages [FOS 00], cependant il est primordial car il induit le dimensionnement du barrage.

La sécurité des ouvrages hydrauliques en remblai est traditionnellement évaluée, en France comme à l'étranger, à l'aide de démarches déterministes. Cependant, depuis quelques décennies, la prise en compte de considérations probabilistes se développe dans différents domaines du Génie Civil, notamment en ce qui concerne la géotechnique, et les réglementations évoluent. En France par exemple, la documentation concernant les ouvrages hydrauliques a récemment été modifiée grâce au Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) qui a publié des recommandations pour la justification des barrages en remblai [CFBR 10] et qui proposent l'adoption de démarches semi-probabilistes établissant une cohérence avec les recommandations des Eurocodes.

Dans ce cadre, un travail de thèse a été engagé pour développer une démarche probabiliste pour l'évaluation de la fiabilité structurale des ouvrages hydrauliques en remblai vis-à-vis du mécanisme de glissement. Le développement d'une telle démarche nécessite d'apporter des réponses à trois questions scientifiques :

- l'élaboration d'un modèle déterministe d'évaluation de la stabilité de l'ouvrage : nous utilisons un modèle éléments finis pour la modélisation hydraulique des pressions interstitielles et pour la modélisation du mécanisme de glissement ; ce modèle doit permettre de prendre en compte les paramètres pour lesquels une modélisation probabiliste est pertinente ;
- la modélisation probabiliste de la variabilité spatiale des propriétés des matériaux constituant le remblai ; une partie de ces données permet également de modéliser le caractère aléatoire des actions hydrauliques auxquelles l'ouvrage est soumis. ;
- le couplage mécano-fiabiliste qui intègre les modèles de variabilité spatiale au modèle éléments finis du mécanisme de glissement.

Le présent article se focalise essentiellement sur la première question scientifique : l'élaboration d'un modèle éléments finis permettant à la fois de modéliser l'écoulement interne au remblai et d'évaluer de façon déterministe la stabilité des ouvrages hydrauliques en remblai en obtenant le facteur de sécurité de l'ouvrage, puis permettant ensuite la prise en compte de champs aléatoires (deuxième question scientifique) et le couplage avec le code de calcul de fiabilité (troisième question scientifique).

Concernant les outils numériques utilisés dans de telles études de stabilité, des codes permettant de traiter la justification de la stabilité des pentes existent dans le commerce (nous pouvons notamment citer certains codes très employés : ©Geostudio, ©Plaxis et ©FLAC). Ils sont généralement d'utilisation relativement simple et permettent de considérer un grand nombre d'aspects inhérents au calcul de la stabilité par glissement : méthodes à l'équilibre-limite ou aux éléments finis ou aux différences finies, modélisation du comportement saturé ou non saturé des sols, modélisation de différents comportements mécaniques, etc. Néanmoins, ils possèdent la plupart du temps une interface d'utilisation fermée qui ne permet en général pas une modélisation probabiliste des variables d'entrée, ou alors de façon très limitée. C'est notamment le cas de la plupart des codes éléments finis commerciaux qui n'offrent pas la possibilité d'introduire des variables ou des champs aléatoires.

Par ailleurs, des codes éléments finis plus ouverts offrant entre autres la possibilité d'études probabilistes, ont été développés en interne par des industriels (code ©ASTER développé par EDF) ou des laboratoires (code ©LAGAMINE de l'Université de Liège [MAS 08]), mais ils relèvent encore du domaine de la recherche, et ne sont pas complètement disponibles en libre accès pour d'autres laboratoires de recherche ou pour l'ingénierie.

Nous pouvons également évoquer d'autres méthodes numériques utilisées pour évaluer la stabilité des pentes comme la méthode des différences finies utilisée par le logiciel ©FLAC [SRI 10], [CHO 10]. Cette méthode est plus facile à mettre en œuvre que celle des éléments finis, mais est cependant moins flexible et moins précise que celle-ci [FLE 84]. La méthode des éléments discrets, plus dédiée aux milieux granulaires, peut quant à elle être

utilisée dans le cas des barrages en enrochements, mais son coût en termes de temps de calcul est prohibitif dans le cas d'une analyse probabiliste.

Il y a donc un intérêt scientifique et technique important au développement d'un modèle éléments finis à partir d'un code ouvert, en accès libre, permettant la modélisation hydraulique et mécanique des ouvrages hydrauliques en remblai, ainsi que l'intégration de considérations probabilistes sur les différentes variables d'entrées (paramètres des matériaux et sollicitations), et permettant de réaliser une analyse de la fiabilité structurale des ouvrages.

Le code éléments finis ©Cast3M a été retenu dans le cadre du travail de thèse. Ce code a été initialement développé par le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) et est principalement dédié à l'analyse des structures et à la modélisation en mécanique des fluides. En accès libre, il constitue une boîte à outils variés permettant de modéliser des problèmes diverses, et notamment des ouvrages hydrauliques dans notre cas.

Nous présentons dans la suite la démarche de travail et les éléments de modélisation permettant l'évaluation de la stabilité d'ouvrages hydrauliques en remblai développée sous ©Cast3M. Cette évaluation nécessite trois étapes : la modélisation hydraulique, la modélisation mécanique d'un état initial, et l'obtention du facteur de sécurité par la méthode de réduction des paramètres. En conclusion, nous ouvrons les perspectives envisagées dans la thèse pour la prise en compte de champs aléatoires et le couplage avec un code de fiabilité.

Pour chacune des trois étapes, une démarche de modélisation similaire à celle menée avec ©Cast3M a été réalisée en parallèle avec le logiciel commercial ©Geostudio, dédié à l'étude de problèmes géotechniques. La comparaison des résultats issus des deux codes aux éléments finis permet la calibration de notre modèle.

2. Modélisation de l'écoulement au sein de l'ouvrage avec ©Cast3M

La prise en compte du comportement hydraulique des sols est une donnée fondamentale en géotechnique, et notamment dans le cas des ouvrages hydrauliques en remblai. En effet, le développement et l'évolution des pressions interstitielles au sein du remblai peut engendrer des problèmes de stabilité, notamment lors des phases de remplissage ou de vidange de la retenue [HUA 09]. Parallèlement, le degré de saturation d'un sol a une influence non négligeable sur sa cohésion [MAS 08], ce qui a une influence positive sur la stabilité des talus. Ces phénomènes, dus au comportement non saturé des sols, se doivent d'être pris en compte dans la modélisation d'un ouvrage hydraulique, ce qui n'est pas toujours le cas dans les études de stabilité relatives aux barrages.

Le modèle présenté ici considère à la fois le comportement non saturé des matériaux constituant l'ouvrage et le caractère transitoire de l'écoulement au sein du remblai, en résolvant l'équation de Richards [1] :

$$C(P) \frac{\partial h}{\partial t} = -\text{div}[-K(P) \times \overrightarrow{\text{grad}}(h)] \quad [1]$$

où h est la charge hydraulique (en mètres de colonne d'eau) et $P = (h - z) \gamma_e$ la pression interstitielle au sein du remblai dépendant de la cote z et du poids volumique de l'eau γ_e . Cette équation est semblable à celle de Darcy décrivant l'écoulement en milieu saturé sauf que la perméabilité $K(P)$ et la capacité capillaire $C(P) = \partial \theta / \partial P$ (θ : teneur en eau volumique) ne sont pas des constantes mais dépendent de la pression P régnant dans le matériau. La formulation de Van Genuchten [2] est employée dans notre modèle pour décrire l'évolution de la saturation en fonction de la pression.

$$S(P) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (-\alpha \times P)^n]^{-m} \quad [2]$$

où θ_r et θ_s désignent respectivement la teneur en eau volumique résiduelle et la teneur en eau volumique à saturation, et α, m et n sont des paramètres du modèle. La perméabilité est ensuite obtenue à partir d'une loi puissance faisant intervenir la perméabilité à saturation et un paramètre B :

$$K(P) = K_{sat} \times S(P)^B \quad [3]$$

Le modèle développé avec ©Cast3M permet la modélisation du comportement hydraulique de différents matériaux en intégrant pour chacun les fonctions décrites par les équations [2] et [3]. L'exemple considéré ci-après est constitué d'un noyau central plus étanche sur lequel s'appuient des recharges plus perméables. Le matériau en fondation est hydrauliquement semblable à celui des recharges.

La géométrie utilisée est bidimensionnelle et correspond au profil type du barrage d'étude. Le maillage est composé d'éléments quadrangulaires de type « fluide » (nœuds aux sommets, faces et centre d'un élément).

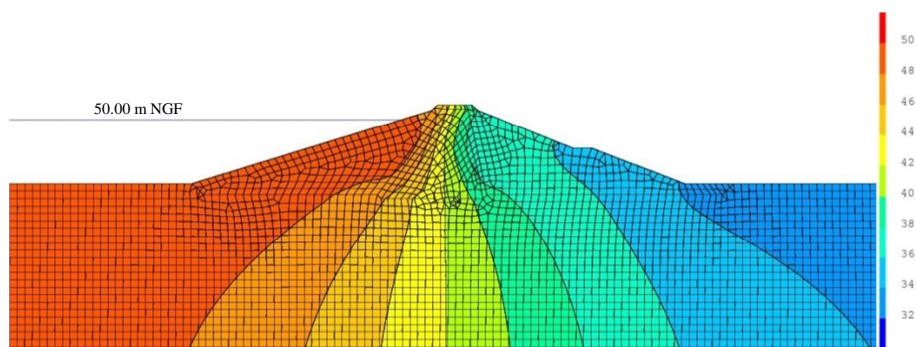


Figure 1. Charge hydraulique (m) calculée par le modèle hydraulique

Dans un premier temps, nous nous intéressons à la modélisation de l'écoulement en condition normale d'exploitation, c'est-à-dire lorsque le régime permanent est établi. Comme le décrit l'équation [1], le calcul est cependant mené en régime transitoire, ce qui permettra par la suite de modéliser des situations plus critiques pour la stabilité de l'ouvrage, comme des cas de remplissage ou de vidange rapide de la retenue. Le régime permanent est donc obtenu en considérant une phase courte de remplissage suivie d'une phase de maintien de la cote normale du plan d'eau (50.0 NGF pour l'exemple représenté ici) sur une durée relativement longue (3 ans). La condition à la limite amont correspond à la pression hydrostatique de la retenue exercée sur le talus et la cuvette. A l'aval, une charge constante égale à la cote du pied de talus est appliquée sur la face supérieure de la fondation. Sur les autres faces du maillage, le flux hydraulique est considéré nul.

Le champ de charge obtenu sous ©Cast3M [Figure 1] en régime permanent correspond bien à celui donné par d'autres codes éléments finis. La modélisation réalisée avec le logiciel commercial ©Geostudio avec les mêmes hypothèses donne des résultats similaires permettant la validation de notre modèle.

Les tracés à l'aide des deux codes éléments finis du champ de vitesse de l'écoulement sur chaque élément du maillage sous forme de vecteurs [Figure 2] illustrent le fait que le comportement non saturé des différents matériaux est modélisé de façon identique dans les deux cas. L'écoulement se fait principalement dans les zones du barrage où les matériaux sont les plus perméables (recharges et fondation), et il se fait très peu dans la zone non saturée située au-dessus de la ligne piézométrique dans la recharge aval.

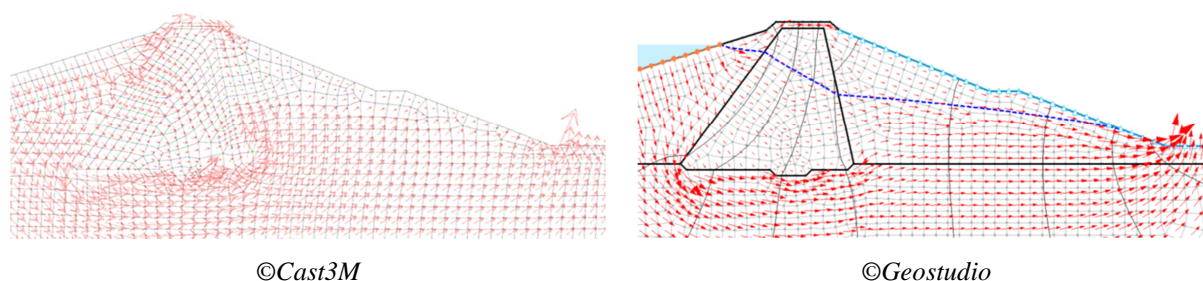


Figure 2. Champ de vecteurs vitesse calculé en régime permanent – Comparaison ©Cast3M et ©Geostudio

3. Modélisation mécanique de l'état de contraintes effectives initiales avec ©Cast3M

Une fois le calcul hydraulique effectué, le programme développé grâce au code ©Cast3M intègre un calcul non linéaire d'un état initial des contraintes qui servira de point de départ dans le calcul du facteur de sécurité par la méthode de réduction des paramètres. La résolution des équations mécaniques est réalisée à l'aide d'une procédure interne au logiciel qui permet d'effectuer un calcul non linéaire incrémental.

L'analyse mécanique utilise la même géométrie et le même maillage que le calcul hydraulique mis à part le type d'éléments qui est cette fois adapté au problème mécanique (quadrangles à 8 nœuds, 9 points de Gauss). Le calcul est donc bidimensionnel et est réalisé en déformations planes (la déformation selon l'axe perpendiculaire au plan est supposée nulle), ce qui est généralement admis pour les ouvrages hydrauliques dont une des dimensions est généralement très supérieure aux deux autres.

La non linéarité du calcul est due à la prise en compte de la plasticité du remblai. Pour la modéliser, le critère de rupture de Mohr-Coulomb est utilisé. Ce critère de plasticité est le plus couramment utilisé dans les

problèmes élasto-plastiques en géotechniques, bien qu'il implique certaines difficultés numériques à cause des extrémités aiguës de la pyramide hexagonale décrite par le critère dans l'espace des contraintes [ABB 95].

La loi de comportement utilisée dans notre modèle contourne ces difficultés en réalisant une approximation hyperbolique du critère de plasticité de Mohr-Coulomb. Elle est décrite dans [ABB 95], et est directement implémentée dans ©Cast3M sous le nom « RH_COULOMB ». La plasticité est parfaite (pas d'écrouissage) et associée (pas de prise en compte de la dilatance du sol). En plus des paramètres de l'élasticité linéaire (module d'Young, coefficient de Poisson, et poids volumique), cette loi nécessite la connaissance de l'angle de frottement et de la cohésion du matériau.

Le modèle de comportement élasto-plastique pris en compte actuellement dans notre modèle reste simple mais est suffisamment bien adapté au problème d'analyse de stabilité des pentes par glissement. En effet, la plupart des auteurs d'études de stabilité de pentes basées sur la méthode des éléments finis utilisent la plasticité parfaite décrite par le critère de Mohr-Coulomb, même s'ils considèrent néanmoins une règle d'écoulement non associée avec une dilatance nulle, celle-ci ayant peu d'influence sur le facteur de sécurité [GRI 99], [MAS 08]. Une règle d'écoulement associée présente l'avantage de donner une meilleure correspondance entre le mécanisme de rupture prédit par les éléments finis et les surfaces de rupture générées par la méthode à l'équilibre-limite [GRI 99]. Cependant, elle prédit une dilatance très supérieure à ce qui est observé en réalité [GRI 99].

Toutefois, une amélioration du modèle est en passe d'être apportée grâce à l'implémentation récente dans ©Cast3M d'une loi de comportement spécifique aux sols nommée « DP_SOL » et utilisant un modèle de plasticité Drucker-Prager avec une règle d'écoulement non associé et un écrouissage non linéaire. Nous prévoyons de l'utiliser dans la suite de la thèse.

Le chargement imposé au modèle comporte trois composantes : le poids propre de l'ouvrage, la pression hydrostatique appliquée par la retenue, et les pressions interstitielles calculées précédemment. Ces charges sont assemblées sous forme d'un vecteur de forces nodales qui est ensuite appliqué au maillage de façon incrémentale. Durant le calcul, les déplacements à la base de la fondation sont bloqués dans les directions horizontale et verticale et ne sont autorisés que le long de l'axe vertical sur les flancs du modèle.

La modélisation du mécanisme de glissement des ouvrages hydrauliques en remblai proposée sous ©Cast3M considère comme point de départ le calcul du champ de contraintes du remblai déjà en place, c'est-à-dire que la modélisation de la phase de construction du barrage par couches ainsi que la phase de remplissage de l'ouvrage n'est pas nécessaire. L'application progressive du chargement pour le calcul des contraintes du barrage déjà en place est artificielle mais moins lourde à mettre en œuvre que les méthodes plus réalistes de construction par remblai ou déblai [MAS 08]. Dans le cas de calculs non linéaires, la méthode employée pour la création du talus a une influence sur le chemin des contraintes. Cependant elle n'en a pas sur le facteur de sécurité tant que la loi de comportement utilisée reste simple [GRI 99].

La figure 3 représente la composante verticale du champ de contraintes obtenu à l'issue du calcul non linéaire, les contraintes de compression étant comptées positivement.

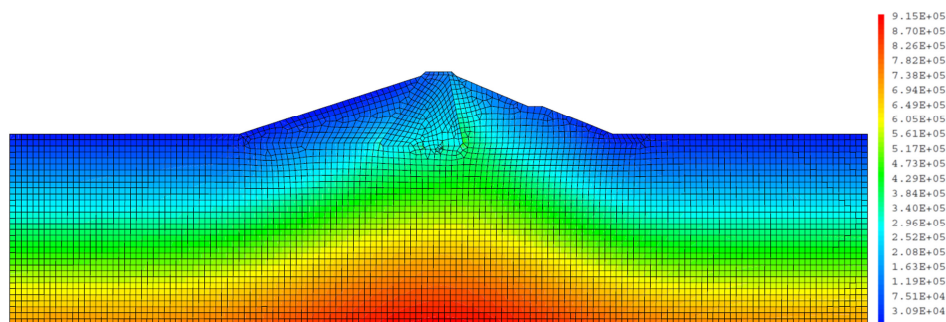


Figure 3. Champ de contraintes effectives verticales calculé avec ©Cast3M

Comme pour le calcul hydraulique, une simulation identique est réalisée avec le logiciel ©Geostudio afin de valider les résultats obtenus. Les profils de contraintes obtenus selon l'axe du barrage [Figure 4] montrent que les deux codes éléments finis donnent des résultats similaires, sans être tout à fait identiques. Les différences obtenues sont dues aux lois de comportement des deux logiciels qui ne sont pas exactement les mêmes, bien que la similitude des résultats indique que celle utilisée sous ©Cast3M est bien adaptée, ce qui valide son choix.

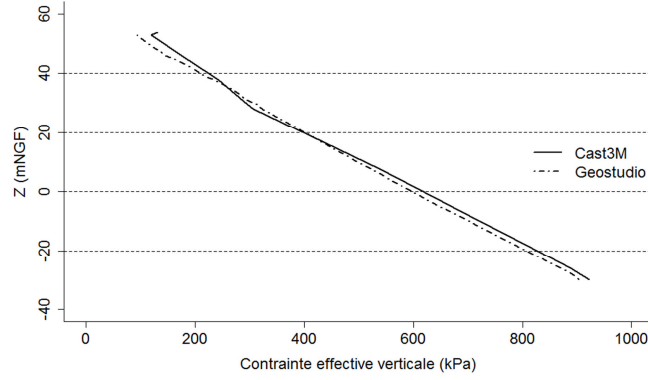


Figure 4. Contraintes effectives verticales : Comparaison ©Cast3M/©Geostudio

4. Implémentation de la méthode de réduction de paramètres dans ©Cast3M pour l'analyse de stabilité

L'analyse de la stabilité des pentes est classiquement réalisée dans le domaine de l'ingénierie à l'aide de méthodes dites « à l'équilibre-limite ». Le facteur de sécurité est calculé le long d'une surface de glissement définie comme le ratio entre les forces résistantes et les forces mobilisées. Ces méthodes ont le mérite d'être relativement simples d'utilisation et de ne nécessiter que peu de données. Cependant, elles sont limitées par un certain nombre d'hypothèses, notamment sur les interactions inter-couches et sur la localisation de la surface de rupture [GRI 99].

La méthode des éléments finis apparaît depuis quelques années comme une alternative aux méthodes à l'équilibre-limite dans l'analyse de stabilité des pentes. Elle présente certains avantages comme la modélisation de la déformabilité des géomatériaux, et le fait que la surface de rupture se déduit automatiquement du calcul. De plus, et c'est ce qui intéresse notre travail, la méthode des éléments finis permet d'intégrer relativement facilement la modélisation probabiliste des différents paramètres mécaniques et hydrauliques des sols sous forme de champs aléatoires.

La technique de réduction de paramètres est certainement la méthode d'analyse de stabilité la plus employée dans les études utilisant les éléments finis disponibles dans la littérature [GRI 99], [CHO 10], [MAS 08]. Elle consiste à diminuer progressivement d'un facteur F_S les propriétés mécaniques de résistance au cisaillement du sol (cohésion c' et angle de frottement interne φ') ayant un comportement élasto-plastique, jusqu'à l'apparition de la rupture. Les paramètres réduits c'_f et φ'_f sont définis par :

$$c'_f = c' / F_S ; \quad \varphi'_f = \tan^{-1} \left(\tan(\varphi') / F_S \right) \quad [4]$$

Bien que d'autres définitions de la rupture existent, il est généralement considéré qu'elle s'est produite lorsque la convergence du calcul ne s'obtient plus dans un nombre d'itérations prédéfini [GRI 99]. A la rupture, le critère de Mohr-Coulomb s'écrit :

$$\tau_{max} = \frac{c'}{F_{S,f}} + \sigma_{n,max} \frac{\tan(\varphi')}{F_{S,f}} = c'_f + \sigma_{n,max} \tan(\varphi'_f) \quad [5]$$

Le facteur de réduction critique $F_{S,f}$ est donc le coefficient par lequel doit être divisée la résistance au cisaillement initiale pour amener la pente à son point de rupture [GRI 99]. Cette définition est analogue à celle du facteur de sécurité des méthodes à l'équilibre-limite. Dans la méthode de réduction de paramètres, le facteur de sécurité est donc égal au taux de réduction des paramètres une fois que le calcul ne converge plus.

La non convergence, assimilée à la rupture par cisaillement de la pente, s'accompagne d'une accélération brutale des déplacements nodaux lorsque le facteur de réduction est proche de sa valeur critique [Figure 5]. [GRI 99] propose de tracer le déplacement adimensionnel $E' \delta_{max} / \gamma H^2$ pour identifier le facteur de sécurité, où δ_{max} , E' , γ et H sont respectivement le déplacement nodal maximal au dernier pas convergé, le module d'Young, le poids volumique et la hauteur du barrage.

Le calcul du facteur de sécurité par la méthode de réduction de paramètres a été intégré au modèle développé sous ©Cast3M, et testé sur plusieurs exemples. A partir de l'état de contraintes initial, le calcul non linéaire est poursuivi après avoir réduit les paramètres c' et φ' d'un facteur F_S . Le processus est répété avec des valeurs de F_S croissantes. La non convergence du calcul entraînant un arrêt du programme, un critère d'arrêt a été réalisé. Il consiste à calculer une pseudo-vitesse de déplacements (définie selon un pas de calcul au lieu d'un pas de temps)

à partir de la courbe de la figure 5 et de réduire l'incrément ΔF_s si celle-ci dépasse un seuil. Le calcul s'arrête lorsque ΔF_s devient inférieure à une valeur spécifiée (10^{-3} dans notre cas).

Un calcul identique a également été réalisé avec ©Geostudio pour comparaison. Le tableau 2 donne les facteurs de sécurité calculés avec les deux logiciels éléments finis avec la méthode de réduction de paramètres, et celui calculé par ©Geostudio à l'équilibre-limite à partir du champ de pressions interstitielles et du champ de contraintes initiales issus d'un calcul éléments finis préliminaire.

Tableau 2. Comparaison des facteurs de sécurité obtenus avec les deux logiciels

	©Geostudio	©Cast3M	Méthode à l'équilibre-limite (©Geostudio)
	(1)	(2)	(3)
Facteur de sécurité	1,216	1,221	1,215
Taux de réduction	17,5%	18,1%	17,7%

Le facteur de sécurité calculé est similaire pour les différents cas. Cependant il est calculé sur un cercle défini à l'avance dans le cas à l'équilibre limite [3] alors que cela n'est pas nécessaire lorsqu'il est calculé à l'aide de la méthode de réduction de paramètres ([1] et [2]). Des sorties graphiques tel que le champ de vecteurs déplacements de la figure 5 gauche permettent d'identifier la zone de glissement circulaire à l'issue du calcul de stabilité.

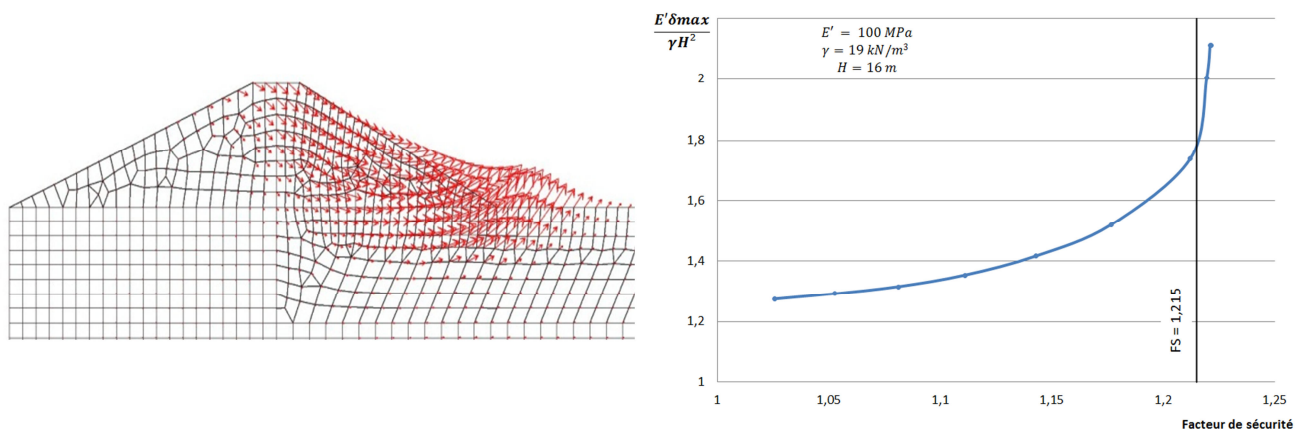


Figure 5. Vecteurs déplacements à la rupture (à g.) – Déplacement adimensionnel vs. facteur de sécurité (à d.)

5. Conclusions et perspectives

Dans une volonté croissante d'améliorer leur sécurité, l'intégration d'approches probabilistes dans l'évaluation de la stabilité des ouvrages hydrauliques en remblai est depuis quelques années apparue comme nécessaire. Les méthodes à l'équilibre-limite traditionnellement utilisées peuvent permettre cette intégration mais de façon très limitée, généralement sous forme de variables aléatoires.

La méthode des éléments finis apporte une alternative aux méthodes classiques d'évaluation de la stabilité car elle permet de s'affranchir d'un bon nombre d'hypothèses, notamment sur la position de la surface de glissement. Elle offre également la possibilité de prendre en compte des considérations probabilistes plus poussées grâce par exemple à une modélisation par champs aléatoires de la variabilité spatiale des propriétés des matériaux constituant l'ouvrage.

Cependant, les logiciels commerciaux utilisant la méthode des éléments finis sont la plupart du temps fermés, et ne permettent pas la réalisation d'études probabilistes complexes intégrant des champs aléatoires. Certains travaux de recherche proposent de telles études, mais dans ce cas les codes éléments finis développés ne sont pas accessibles à la communauté d'utilisateurs.

Pour pallier ces limites, un travail de thèse a été engagé afin de développer une démarche probabiliste complète d'évaluation de la stabilité d'ouvrages hydrauliques en remblai par rapport au glissement basée sur une modélisation aux éléments finis réalisée à l'aide du code éléments finis libre ©Cast3M.

Au stade actuel d'avancement de la thèse, un modèle éléments finis déterministe d'évaluation de la stabilité a été réalisé. Il permet de modéliser l'écoulement au travers du remblai, de représenter le comportement élasto-plastique de l'ouvrage, et d'en calculer le facteur de sécurité grâce à la méthode de réduction des paramètres. Les résultats obtenus ont été validés grâce à une modélisation identique réalisée en parallèle avec le logiciel commercial ©Geostudio.

L'intérêt du modèle déterministe actuel est qu'il servira de base au modèle probabiliste final qui intégrera la modélisation des variables d'entrée du modèle sous forme de champs aléatoires. La variabilité spatiale des paramètres hydrauliques (perméabilité) et mécaniques (cohésion, angle de frottement, poids volumique,...) seront étudiées. La figure 6 illustre un exemple de champ aléatoire que l'on peut obtenir sous ©Cast3M.

La thèse s'appuie pour cela sur un exemple de barrage sur lequel un grand nombre de données de contrôle de compactage ont été recueillies. Ces données ont de plus été géolocalisées grâce à un dispositif de repérage particulier mis en place durant la construction. Une analyse statistique et géostatistique de ces données fournira les caractéristiques des champs aléatoires qui seront introduits au modèle éléments finis précédemment détaillé.

Le modèle probabiliste sera ensuite utilisé pour évaluer la probabilité de défaillance par rapport au glissement grâce à l'emploi de méthodes d'analyse de fiabilité de structure. Le couplage mécano-fiabiliste sera réalisé grâce au logiciel libre ©OpenTURNS.

Enfin, pour effectuer un lien avec le domaine de l'ingénierie, une comparaison avec les méthodes à l'équilibre-limite sera faite pour identifier l'intérêt opérationnel d'une modélisation probabiliste complexe sur l'analyse de la stabilité d'ouvrages hydrauliques en remblai.

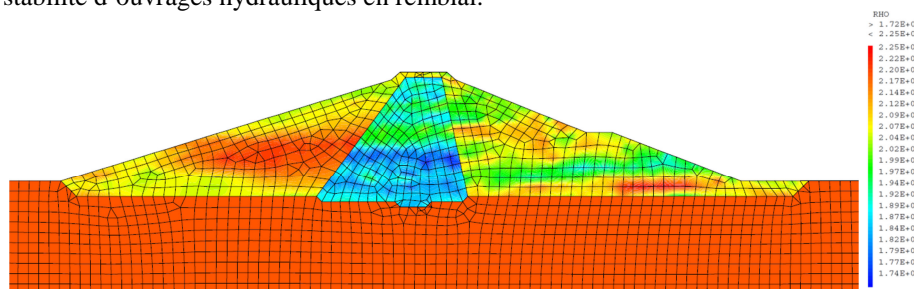


Figure 6. Exemple de champ aléatoire sous ©Cast3M

6. Bibliographie

- [ABB 95] ABBO A.J., SLOAN S.W., « A Smooth Hyperbolic Approximation to The Mohr-Coulomb Yield Criterion », *Computers and Structures*, Vol. 54, n°3, 1995, p. 427-441.
- [CFBR 10] CFBR, Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai, Comité Français des Barrages et Réservoirs, Juin 2010, 114p.
- [CHO 10] CHO S.E., « Probabilistic Assessment of Slope Stability That Considers the Spatial Variability of Soil Properties », *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, p. 975-984.
- [FLE 84] FLETCHER C.A.J., *Computational Galerkin Methods*, New York, Editions Springer-Verlag, 1984
- [FOS 00] FOSTER M., FELL R., SPANNAGLE M., « The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents », *Canadian Geotechnical Journal*, n°37, 2000, p. 1000-1024.
- [GRI 99] GRIFFITHS A., LANE P.A., « Slope Stability Analysis by Finite Elements », *Géotechnique*, n°3, 1999, p. 387-403.
- [HUA 09] HUANG M., JIA C.Q., « Strength Reduction FEM in Stability Analysis of Soil Slopes Subjected to Transient Unsaturated Seepage », *Computers and Geotechnics*, n°36, 2009, p. 93-101.
- [ICOLD 03] ICOLD, World Register of Dams 2003. Registre mondial des barrages 2003, Paris, ICOLD/CIGB, 2003, 340p.
- [ICOLD 95] ICOLD, Dam Failures – Statistical Analysis. Ruptures de barrages – Analyse statistique, Paris, ICOLD/CIGB, 1995, 76p.
- [MAS 08] MASEKANYA J.P., Stabilité des pentes et saturation partielle – Etude expérimentale et modélisation numérique, Thèse de doctorat, Université de Liège, 2008.
- [SRI 10] SRIVASTAVA A., SIVAKUMAR BABU G.L., HALDAR S., « Influence of Spatial Variability of Permeability Property on Steady State Seepage Flow and Slope Stability Analysis », *Engineering Geology*, Vol. 100, 2010, p. 93-101.